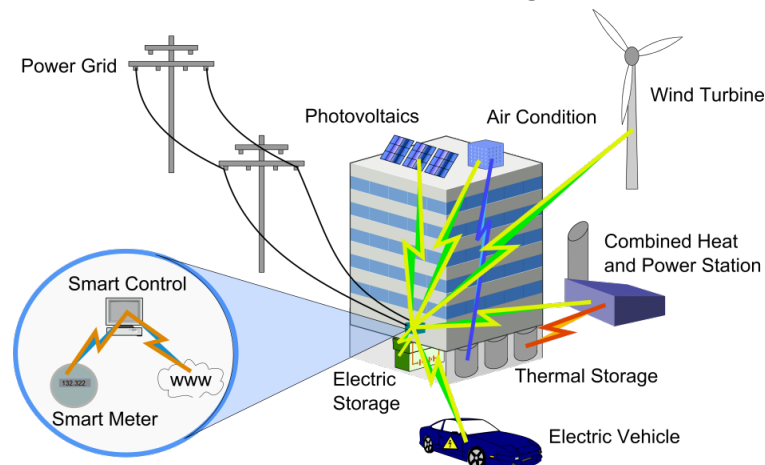


## Smart Building Designer: Eine Methode zur optimalen Auslegung von komplexen Gebäudesystemen



Michael Benz, ETH Zürich, [benzm@ethz.ch](mailto:benzm@ethz.ch), [www.samba.ethz.ch](http://www.samba.ethz.ch)

Araz Ashouri, ETH Zürich, [ashouria@ethz.ch](mailto:ashouria@ethz.ch), [www.samba.ethz.ch](http://www.samba.ethz.ch)

### Zusammenfassung

### Abstract

Gemäss Beschluss des EU-Parlaments vom April 2009 müssen Neubauten in der EU ab 2019 sogenannte Netto-Nullenergie-Bauten sein. Die Investitionskosten der Gebäude und damit das finanzielle Optimierungspotential werden in der Folge deutlich steigen. Parallel dazu entsteht auf der elektrischen Versorgungsseite ein „Smart Grid“, dessen zeitlich variable Stromtarife die Chance bieten, die Interaktionen zwischen Gebäude und Versorgungsnetz zu optimieren. Diese beiden Stossrichtungen führen zu sogenannten „Smart Buildings“.

Deshalb wird im Rahmen dieses Projektes ein Designtool für die optimale Auswahl und Dimensionierung des Gebäudesystems erstellt. Als Komponenten sind sowohl thermische als auch elektrische Speicher sowie diverse Heiz- und Kühlaggregate und erneuerbare Energiequellen implementiert. Um die diversen Konfigurationen miteinander vergleichen zu können, wird parallel dazu eine optimale Betriebsstrategie der Komponenten hergeleitet. Dabei kann der Einfluss diverser gesetzlicher Richtlinien als auch variabler Preissysteme auf die Auslegung der Gebäudekomponenten untersucht werden.

As decided by the European Parliament in April 2009, starting from 2019, new buildings must be so-called net-zero energy buildings. The capital cost of these building systems and thus the potential for optimization will increase significantly. In addition, on the electric supply side, a smart grid with time-varying electricity tariffs may be established. These two directions of impact offer the opportunity to optimize the interactions between the building and the distribution grid. The so-called smart building results.

Therefore, in this project a design tool for the optimal selection and sizing of the building system is derived. Thus, building services components such as thermal and electrical storages, various heating and cooling systems, and renewable energy sources are modeled and implemented into the software framework. To enable the comparison of different configurations and sizings of the building service components, an optimal operating strategy for the system is computed in parallel. Finally, the impact of various regulatory policies and variable pricing systems on the design of the building components are examined.

# 1. Ausgangslage

Die Gebäudeinfrastruktur spielt eine zentrale Rolle in der modernen Gesellschaft. Gleichzeitig entfällt ungefähr 40% des weltweiten Energieverbrauchs auf die Gebäudeinfrastruktur. Ein grosser Teil wird für die Raumwärme bzw. -kühlung eingesetzt, der Rest für Warmwasser, Lüftung, Haustechnik, die Beleuchtung und interne Geräte wie zum Beispiel Computer.

Unabhängig davon ist damit zu rechnen, dass die Fördermenge von Öl und Gas in absehbarer Zeit trotz steigender Nachfrage zurückgehen wird, was zu massiven Preissteigerungen von fossilen Energieträgern führen wird. Zusätzlich wird der schwankende Anteil erneuerbarer Energieträger wie Wind- und Solarenergie zur Stromproduktion weiter zunehmen, so dass der Bedarf an Regelleistung im Stromnetz deutlich steigen wird.

Mit der Einführung eines „Smart Grid“ auf der Versorgerseite, müssen die Interaktionen zwischen Gebäude und Versorgungsnetz optimiert werden. Die Gebäudebetreiber können dank intelligentem Speicher- und Lastmanagement, ihre Betriebskosten minimieren und sogar das Stromnetz entlasten [1]. So können Überproduktionen aus erneuerbaren Energieträgern in Gebäudespeicher zwischengelagert werden und danach bei Produktionsengpässen wieder eingesetzt werden. Diese sogenannten „Smart Buildings“ werden dadurch die benötigte Regelleistung auf der Stromnetzseite reduzieren [2].

Zusätzlich werden infolge gesetzlicher Richtlinien, die Anforderungen an das Gebäudesystem weiter steigen und der Einsatz fossiler Energieträger weiter reduziert werden. Deshalb müssen vermehrt dezentrale Produktionsanlagen, wie gebäudeintegrierte Photovoltaiksysteme eingesetzt werden. Die Auslegung dieser hybriden Gebäudesysteme ist eine anspruchsvolle Aufgabe.

Die Vielfalt der Gebäudesysteme erschwert zudem allgemeingültige Aussagen über deren optimale Auslegung zu machen. Je nachdem ob es sich um ein Geschäfts-, ein Wohn- oder ein Industriegebäude handelt, sind die Nutzungsszenarien bzw. Anforderungen an die Gebäudetechnik sehr verschieden. Zusätzlich herrschen an jedem Standort andere Rahmenbedingungen betreffend Wetterverhältnisse, gesetzliche Richtlinien, Energietarife und zur Verfügung stehende Fördermittel.

Basierend auf diesen Rahmenbedingungen muss der Gebäudesystemplaner sowohl eine optimale Auswahl als auch eine optimale Dimensionierung der eingesetzten Komponenten für jedes Gebäudesystem sicherstellen. Falls nun in Zukunft noch komplexere Systeme mit internen Speichermöglichkeiten, erneuerbaren Energiequellen und variable Stromtarife dazukommen, ist die Lösung dieses Auslegungsproblems nur noch mit geeigneten Simulation- und Optimierungswerkzeugen möglich. Es kommt erschwerend dazu, dass die optimale Auswahl der Komponenten nicht losgelöst von deren Dimensionierung und der verwendeten Betriebsstrategie beantwortet werden kann. Abbildung 1 zeigt diese Zusammenhänge exemplarisch.

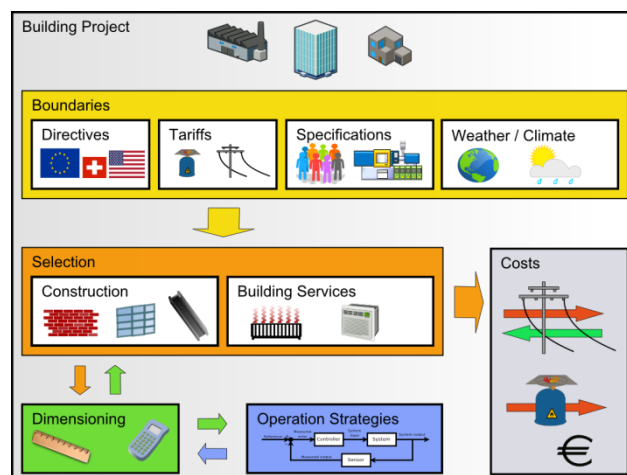


Abbildung 1 Gebäudeprojekt: Ablauf der Konzeptphase

In den folgenden Kapiteln wird die, für die Lösung dieser Aufgabe, entwickelte Softwareumgebung kurz vorgestellt und anhand eines Fallbeispiels die Möglichkeiten und Grenzen des Tools aufgezeichnet.

## 2. Vorgehen

Um die Abhängigkeit bei der Auslegung des Gebäudesystems von der verwendeten Betriebsstrategie zu vermeiden, wird eine optimale Betriebsstrategie der ausgewählten Komponenten berechnet. Somit kann verhindert werden, dass eine gute Auslegung wegen einer schlechten untergeordneten Betriebsstrategie hohe Betriebskosten zur Folge hat. Mit dieser Methodik lassen sich die diversen Systeme so besser untereinander vergleichen. Falls zudem vermehrt Speichersysteme zum Einsatz kommen, wird ein effizientes Energiemanagement des Gebäudesystems weiter an Wichtigkeit gewinnen, da ansonsten das Potential des Systems nicht ausgenutzt werden kann. Gleichzeitig sollen natürlich die kostenoptimalsten Komponenten mit bestmöglicher Dimensionierung für das gegebene Gebäude und Randbedingungen ausgewählt werden.

### 2.1 Software-Framework

Um dieses komplexe Auslegungsproblem lösen zu können, wird das gesamte Gebäudesystem als ganzzahlig lineares Optimierungsproblem formuliert. Da vereinfacht nur Energieflüsse wie Wärme flüsse ( $P_h$ ), Kälte flüsse ( $P_c$ ), elektrische Leistungen ( $P_e$ ) und Erdgasströme ( $P_g$ ) berücksichtigt werden, lässt sich die optimale Bestimmung der Auswahl, der Dimensionierung und der Betriebsstrategie in einem Schritt innert weniger Sekunden bis Minuten lösen, je nach zur Verfügung stehender Komponenten. Die Abbildung 2 zeigt alle möglichen Energieflüsse des Gebäudesystems zwischen den Hauptkomponenten Gebäude (BDG), Speicher (STO), Energiekonverter (CON) und den externen Lieferanten (EXT) von Gas und Elektrizität.

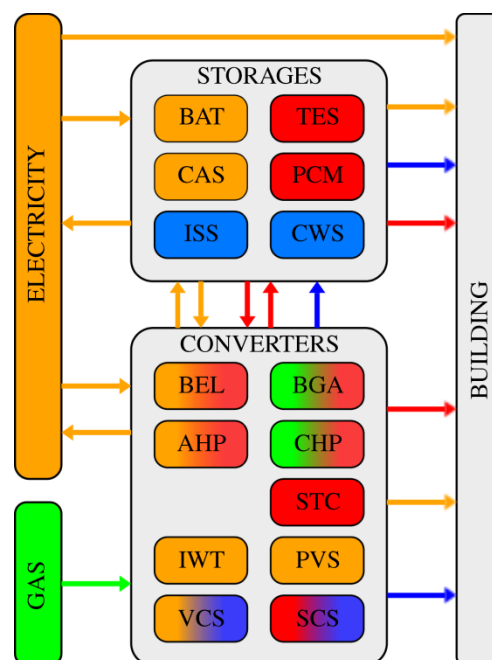


Abbildung 2 Übersicht über die Energieflüsse im „Smart Building Designer“ und dessen wichtigsten Bestandteile: Gebäude, Konverter und Speicher. Rote Pfeile repräsentieren Wärme flüsse, blaue Kälte flüsse, grüne Gasleistungen und braune elektrische Leistungsflüsse.

Für die Stromversorgung des Gebäudes gilt für jeden Zeitschritt folgende Randbedingung

$$P_{e,EXTtoBDG} + P_{e,STOtoBDG} + P_{e,CONtoBDG} = P_{e,BDGi} \quad (1)$$

Dies ist gleichbedeutend, dass der Stromverbrauch entweder von extern oder von den Blöcken Speicher oder Konverter zur Verfügung gestellt werden muss. Alle Energieflüsse müssen zwingend positiv oder null sein. Die Randbedingungen der anderen Blöcke können analog dazu hergeleitet werden.

## Gebäudemodell

Das Gebäude wird als ein sogenanntes „Einzonenmodell“ definiert [3], bei dem eine mittlere Gebäudetemperatur definiert, ob im Moment ein Kühl- bzw. Heizbedarf besteht. Der mittlere Temperaturverlauf wird ebenfalls optimiert, so kann zum Beispiel das Gebäude im Sommer an sehr heissen Tage vorgekühlt werden, um die Belastung des Kühlsystems tagsüber zu reduzieren.

Falls die mittlere Gebäudetemperatur vom gewählten Sollwert abweicht, wird dies mit Kosten für das menschliche Unbehagen bestraft [3], welche mit vermehrter Abweichung vom Sollwert stark zunehmen. So wird gewährleistet, dass die gewünschte Solltemperatur meistens  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  eingehalten wird. Dank diesen Kosten für das Unbehagen wird vermieden, dass zum Beispiel das Kühlsystem des Gebäudes nur für wenige Stunden im Jahr stark überdimensioniert wird. Während dieser Zeit wird in Kauf genommen, dass im Gegensatz zu harten Randbedingungen leicht erhöhte oder leicht kühlere Temperaturen im Gebäude toleriert werden.

Der Stromverbrauch wird anhand von Nutzungsszenarien berechnet ([4], [5]). Die Wetterdaten, um die Wärmeflüsse durch die Gebäudehülle sowie den solaren Eintrag ins Gebäude zu berechnen, werden mittels der Software Meteonorm generiert [6].

Für die Fallstudie wird ein Bürogebäude mit 12 Stockwerken verwendet. Die weiteren Parameter des Gebäudes sind in Tabelle 1 gezeigt.

Energiebezugsfläche	9600 m <sup>2</sup>
Aussenwandfläche	1931 m <sup>2</sup>
Verglaste Aussenfläche	2349 m <sup>2</sup>
Gesamte Wärmekapazität	1.75 GJ/K
Wärmeverlustkoeffizient Wand	0.5 W/K m <sup>2</sup>
Wärmeverlustkoeffizient Fenster	2.6 W/K m <sup>2</sup>

Tabelle 1 Kennzahlen des Bürogebäudes das in der Fallstudie verwendet wird.

## Komponenten

Die folgenden Gebäudetechnikkomponenten wurden im Smart Building Designer implementiert.

Gebäudeintegrierte Speicher:

- Batteriespeichersystem (BAT) mit einem Vanadium-Redox-Akkumulator
- Druckluftspeichersystem (CAS)
- Warmwasserspeicher (TES)
- Thermischer Speicher basierend auf Phasenwechselmaterialien (PCM)
- Eisspeichersystem (ISS)
- Kaltwasserspeicher (CWS)

Energiekonverter:

- Absorptionskältemaschine (ACS)
- Kompressionskältemaschine (VCS)
- Solarstromanlage (PVS)
- Gebäudeintegrierte Windkraftanlage (IWT)
- Elektrisches Heizregister (BEL)
- Wärmepumpensystem (AHP)
- Thermische Solaranlage (STC)
- Gasbrenner (BGA)
- Wärmekraftkopplungsanlage (CHP)

Da der Smart Building Designer modular aufgebaut ist, können beliebige zusätzliche Module hinzugefügt werden. Abbildung 3 zeigt die internen Energieflüsse des Speicher- bzw. Konverterblocks. Folgende Randbedingungen müssen exemplarisch für die Wärmeflüsse zu

$$P_{h,STOtoCON} + P_{h,CONtoCON} = I_{ACS} \cdot P_{h,ACSin} \quad (2)$$

bzw. aus dem Konverterblock erfüllt werden

$$P_{h,CONtoSTO} + P_{h,CONtoBDG} + P_{h,CONtoCON} = I_{BEL} \cdot P_{h,BELout} + I_{AHP} \cdot P_{h,AHPout} + I_{STC} \cdot P_{h,STCout} + I_{BGA} \cdot P_{h,BGAout} + I_{CHP} \cdot P_{h,CHPout} \quad (3)$$

Falls einer der Komponenten bei der Definition des möglichen Gebäudesystems nicht ausgewählt wird ( $I_{DEV} = 0$ ), fallen diese bei der Generierung der Randbedingungen des Problems weg. Für die optimale Dimensionierung der jeweiligen Komponenten wird am Beispiel des elektrischen Wärmeregisters folgende zusätzliche Randbedingung benötigt

$$\max_{h=1:8760} P_{h,BELout}(h) \leq P_{h,BEL}, \quad (4)$$

wobei  $P_{h,BEL}$  die maximale Heizleistung des elektrischen Wärmeregisters darstellt. Diese Bedingung gilt während des gesamten optimierten Betriebsjahres. Für die restlichen Komponenten können analoge Bedingungen für die Dimensionierung aufgestellt werden.

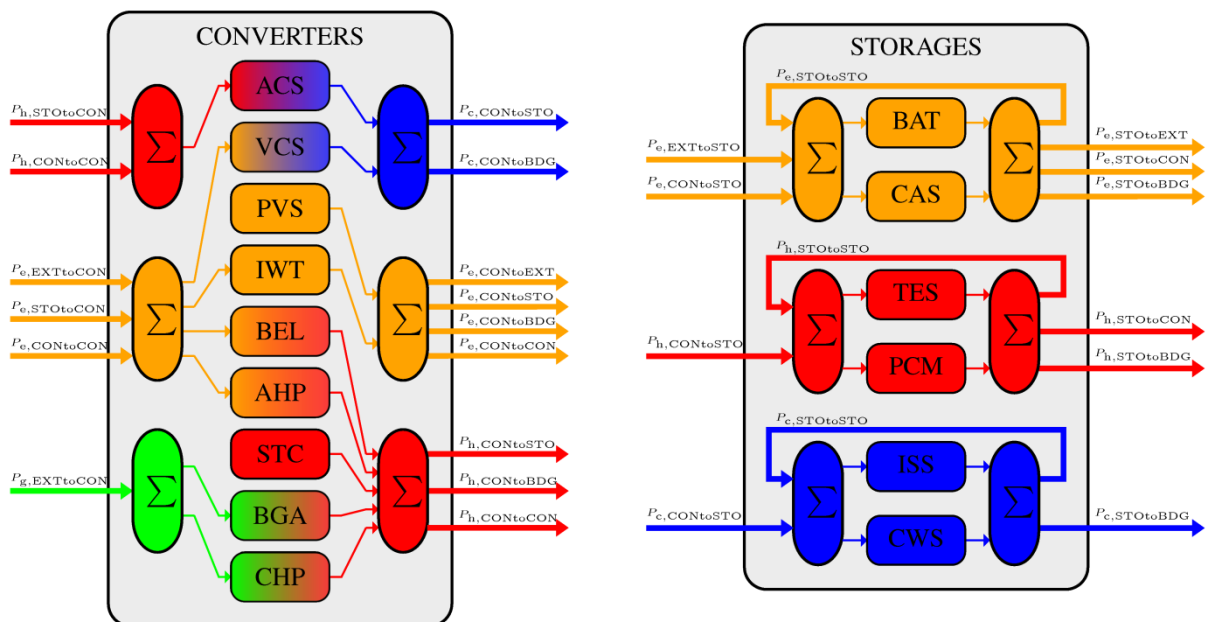


Abbildung 3 Die internen Energieflüsse im Konverter und im Speicher Block.

Falls die Wirkungsgrade der Konverter z.B. abhängig von der Aussentemperatur sind, werden diese vorgängig für ein Betriebsjahr berechnet. Das gleiche gilt für den Ertrag der PV- bzw. Solarthermischen-Anlage pro Fläche. Dieser Wert wird dann während der Optimierung nur noch mit der Grösse der PV-Anlage multipliziert. Die Investitionskosten der einzelnen Komponenten sind proportional abhängig von deren maximalen nominellen Ausgangsleistungen bzw. Speicherkapazitäten.

## 2.2 Strompreise

Verschiedene Tarifmodelle können im Smart Building Designer ausgewählt werden. Für die vorliegende Fallstudie wird ein variables Tarifmodell verwendet [3], das sowohl die aktuellen Produktionskosten, die stündliche Netzauslastung sowie die stündlichen Kosten für die Bereitstellung von Reserveleistung berücksichtigt. Natürlich kann aber auch ein einfaches Tag-/Nacht-Tarifmodell ausgewählt werden. Bei einer allfälligen Rückspeisung ins Netz können ebenfalls diverse Tarifmodelle gewählt werden.

## 2.3 Gütekriterium

Für die Bewertung der Auslegungen werden die Netto-Kapitalkosten der Investitionen, der nötigen Wartungsarbeiten, der Betriebskosten und der Ersetzung der einzelnen Komponenten am Ende ihrer Lebensdauer berücksichtigt. Die Berechnung der Netto-Kapitalkosten erfolgt über zwanzig Jahre. Staatliche Fördermittel können entweder von den Investitionskosten abgezogen werden oder proportional zum jeweiligen Energiefluss der Komponente berücksichtigt werden. Für eine Solarstromanlage kann somit zum Beispiel eine kostendeckende Einspeisevergütung bzw. eine Entlastung der Anfangsinvestition berücksichtigt werden.

## 2.4 Globale Randbedingungen

Infolge zukünftiger gesetzlicher Richtlinien werden zusätzlich sogenannte globale Randbedingungen definiert. So kann zum Beispiel der externe Energiebedarf oder  $\text{CO}_2$ -Austoss des HLK-Systems oder des gesamten Gebäudesystems limitiert werden. Der Optimierer hat dann die Möglichkeit entweder energieeffizientere aber teurere Konverter zu verwenden, bzw. die zusätzlich benötigte Energie im Gebäude mittels PV- oder thermischer Solaranlagen zu produzieren.

## 2.5 Lösung des Optimierungsproblems mittels ganzzahlig linearer Programmierung.

Dank des ganzzahlig linearen Optimierungsproblems lässt sich nun die Auswahl, die Dimensionierung und die optimal dazugehörige Betriebsstrategie in einem Schritt lösen. Die optimale Betriebsstrategie wird dabei für ein Referenzjahr bestimmt und die Kosten für die gewählten Komponenten und deren Grösse entsprechend auf 20 Jahre hochgerechnet.

Die gesamte Software ist in Matlab implementiert und benutzt als Modellierungssprache YALMIP [7], eine Toolbox für MATLAB™. Die Lösung des Problems erfolgt durch den hocheffizienten linearen Solver CPLEX [8].

## 3. Resultate

Simulationsergebnisse zeigen, dass bei den heutigen Energiepreisen und gesetzlichen Rahmenbedingungen relativ einfache Gebäudesysteme immer noch kostenoptimal sind. Weder ein Batteriespeicher noch ein grosser Wärmespeicher machen wirtschaftlich Sinn. Um die Auswirkungen erhöhter Anforderungen an den Energiebedarf aus fossilen Energiequellen aufzuzeigen, wurde folgende Fallstudie durchgeführt.

Das Bürogebäude aus Abschnitt 2.1 wurde einer Limitierung des externen Energiebedarfs unterzogen. Dabei wurde der maximale externe Energiebedarf von  $90 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$  sukzessive auf  $30 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$  reduziert. Dieser Energiebedarf beinhaltet sowohl den Verbrauch des HLK-Systems als auch die internen Lasten wie zum Beispiel Licht und Computer. Die internen Lasten sind dabei in der Grössenordnung von  $65 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ . Die Auswirkung auf die Auswahl der Komponenten und ihrer Dimensionierung in Abhängigkeit der Limitierung ist in Abbildung 4 dargestellt.

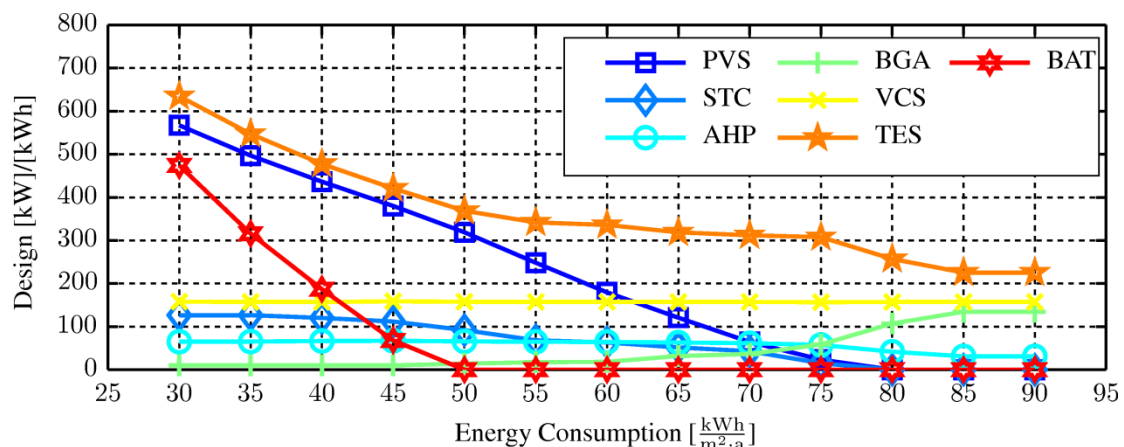


Abbildung 4 Optimale Komponentengrößen in Abhängigkeit der Limitierung des externen Energiebedarfs.



Ohne eine Limitierung des externen Energiebedarfs ( $>90 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ ) wird der Strom kostenoptimal zu 100% vom Stromnetz bezogen. Die Wärme wird mittels Wärmepumpe bzw. Gasbrenner kostenoptimal erzeugt. Ab einer Limitierung von  $85 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$  wird der Gasbrenner mehr und mehr durch die energieeffizientere Wärmepumpe ersetzt. Zudem steigt nun das Volumen des Wärmespeichers an, um so höhere Aussentemperaturen auszunutzen und die Wärmepumpe bei einem höheren COP laufen lassen zu können und danach die Wärme. Wird die Limitierung weiter verschärft, muss ein Teil des Energiebedarfs mittels einer integrierten PV-Anlage produziert werden. Ab  $45 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$  muss zudem ein Batteriespeicher eingesetzt werden, um überschüssigen Solarstrom zwischenspeichern zu können. Ebenfalls wird die Leistung der thermischen Solarkollektoren und die Kapazität des Wärmespeichers weiter erhöht, um einen Grossteil der benötigten Wärmeenergie für Warmwasser und Heizung gebäudeintern zu produzieren.

In Abbildung 5 wird die Kostenentwicklung in Abhängigkeit der Limitierung aufgezeigt. Dabei zeigt sich, dass die Kosten für die Bereitstellung des Energiebedarfs durch interne Quellen sehr hohe Investitionskosten zur Folge haben. Gleichzeitig nehmen die jährlichen Betriebskosten von mehr als 200 k€ auf ca. 50 k€ ab. Über einen Horizont von 20 Jahren lassen sich so doch drei Millionen Euro an Betriebskosten sparen. Die Kosten für das menschliche Unbehagen verändern sich nicht gross, was zeigt, dass die Temperaturen mehrheitlich im Komfortband bleiben.

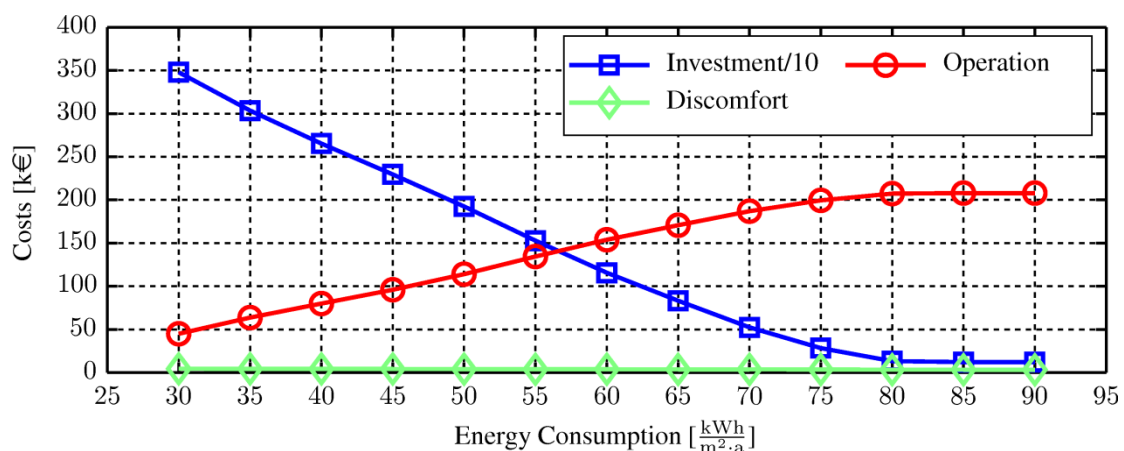


Abbildung 5 Kostenentwicklung in Abhängigkeit der Limitierung des externen Energiebedarfs.

## 4. Diskussion

Die Resultate der Fallstudie haben gezeigt, dass mit dem Smart Building Designer ein wirkungsvolles Tool zur Auslegung von komplexen Gebäudesystemen hergeleitet wurde. Die Einsatzmöglichkeiten reichen von der Auswahl von Gebäudesystemen, deren optimalen Dimensionierung bis hin zur Untersuchung von optimalen Betriebsstrategien. Dabei können die Einflüsse diverser Randbedingungen und deren Einfluss auf die Auslegung des Gebäudesystems untersucht werden. So lässt sich andererseits auch die Wirksamkeit von staatlichen Fördergeldern überprüfen. Im Weiteren können auch kostenoptimale Gebäudehüllen je nach Einsatzgebiet des Gebäudes definiert werden, da der Smart Building Designer das Gebäude bei der Auslegung implizit mitberücksichtigt.

Mittels der Fallstudie wurde gezeigt, dass der Smart Building Designer zur Auslegung eines komplexen Gebäudesystems verwendet werden kann. Dabei wurde untersucht, wie sich eine Limitierung des externen Energiebedarfs auf das Gebäudesystem auswirkt. Es zeigt sich, dass die Energie dann mehrheitlich durch eine integrierte Photovoltaik-Anlage produziert wird. Ein Teil der benötigten Wärmeenergie kommt von thermischen Solarkollektoren. Falls die Limitierung weiter verschärft wird, muss der überschüssig produzierte PV-Strom in Batterien zwischengelagert werden, da eine Rückspeisung ins Stromnetz ausgeschlossen wird. Die Kosten für ein solches Gebäudesystem nehmen natürlich stark zu.

Es zeigt sich, dass bei den heutigen Rahmenbedingungen einfache Systeme mit Gasbrenner und Kompressionskältemaschine im noch einen Kostenvorteil haben.

## 5. Ausblick

Mittels des vorgestellten Optimierungswerkzeugs, können komplexe Gebäudesysteme kostenoptimal ausgelegt werden. Inwiefern sich die gefundenen Betriebsstrategien in Wirklichkeit umsetzen lassen, muss sich aber noch zeigen. Dafür müssten sich die optimalen Betriebsstrategien in einfache Regeln abgeleitet werden können, welche der optimalen Strategie mehrheitlich folgen [9]. Ein anderer möglicher zielführender Ansatz wird im Energiemanagement der neuen „Monte Rosa Hütte“ gezeigt [10].

Dank des einfachen und modularen Aufbaus des Smart Building Designer können beliebige weitere Komponenten hinzugefügt werden, solange sie sich in genügender Genauigkeit linear abbilden lassen.

## Danksagung

Die Entwicklung des Smart Building Designer wird Dank des KTI Projektes SAMBA (Nr. 12122.1) ermöglicht. Die Autoren möchten zudem der Siemens Schweiz AG für die Unterstützung und die Initialisierung des Projektes danken.

## 6. Referenzen

- [1] A. Ashouri, *“Energy Optimization of Buildings Using Model Predictive Control”*. Master thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2010.
- [2] A. Ashouri, S. Gaulocher, P. Korba, *“Office Smart Grid: An Automatic Energy Management System for Buildings Based on Model Predictive Control”*, Special International Conference on Complex Systems: Synergy of Control, Computing & Communications, September 2011.
- [3] J. Vetterli, M. Benz, *“Cost-Optimal Design of an Ice-Storage Cooling System using Mixed-Integer Linear Programming Techniques under Various Electricity Tariff Schemes”*, Journal of Energy and Building, Vol. 49, 2012
- [4] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Empfehlung V380/1,4 Thermische Energie im Hochbau
- [5] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Empfehlung V382/1,2,3, Kühlleistungsbedarf von Gebäuden (1992)
- [6] Meteonorm 6, User Manual, 2010.
- [7] J. Löfberg, *“YALMIP: A Toolbox for Modeling and Optimization in MATLAB”*, Proceedings of the CACSD Conference, Taipei, Taiwan, 2004.
- [8] ILOG CPLEX 10.0, Users Manual, 2006.
- [9] A. Ashouri, M. Benz, L. Guzzella. *“Comparing Control strategies for EV and PHEV fleets providing regulation ancillary services”*, IEEE International Conference on Control Applications (CCA), 2012.
- [10] S. Fux, M. Benz, L. Guzzella, *“New Monte Rosa Hut: Optimal sizing of a stand-alone hybrid energy system”*, Brenet 2012.